JIS Z 4520 (2007) (Japanese): Test procedures for germanium gamma-ray detectors

BLANK PAGE





JIS

ゲルマニウムγ線検出器の試験方法

JIS Z 4520 : 2007

(JEMIMA/JSA)

(2011 確認)

平成 19 年 9 月 20 日 制定

日本工業標準調査会 審議

(日本規格協会 発行)

日本工業標準調査会標準部会 計測計量技術専門委員会 構成表

	氏名	所属
（委員会長）	岡路正博	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
（委員）	石川洋一	社団法人日本電気計測器工業会
	石崎法夫	独立行政法人製品評価技術基盤機構
	石野耕也	環境省
	市原　裕	株式会社ニコン
	伊藤尚美	社団法人日本計量機器工業連合会
	大園成夫	東京電機大学
	河野嗣男	東京都立科学技術大学名誉教授
	頓所達男	日本精密測定機器工業会
	桧野良穂	独立行政法人産業技術総合研究所
（専門委員）	福永敬一	財団法人日本規格協会

主務大臣：経済産業大臣　制定：平成 19.9.20
官報公示：平成 19.9.20
原案作成者：社団法人日本電気計測器工業会
（〒105-0012　東京都港区芝大門 1-2-8　野依ビル　TEL 03-5408-8111）
財団法人日本規格協会
（〒107-8440　東京都港区赤坂 4-1-24　TEL 03-5770-1571）
審議部会：日本工業標準調査会　標準部会（部会長　二瓶　好正）
審議専門委員会：計測計量技術専門委員会（委員会長　岡路　正博）

この規格についての意見又は質問は，上記原案作成者又は経済産業省産業技術環境局基準認証ユニット産業基盤標準化推進室（〒100-8901　東京都千代田区霞が関 1-3-1）にご連絡ください。

なお，日本工業規格は，工業標準化法第 15 条の規定によって，少なくとも 5 年を経過する日までに日本工業標準調査会の審議に付され，速やかに，確認，改正又は廃止されます。

まえがき

この規格は，工業標準化法第 12 条第 1 項の規定に基づき，社団法人日本電気計測器工業会 (JEMIMA)／財団法人日本規格協会 (JSA) から，工業標準原案を具して日本工業規格を制定すべきとの申出があり，日本工業標準調査会の審議を経て，経済産業大臣が制定した日本工業規格である。

制定に当たっては，日本工業規格と国際規格との対比，国際規格に一致した日本工業規格の作成及び日本工業規格を基礎にした国際規格原案の提案を容易にするために，**IEC 60973**：1989，Test procedures for germanium gamma-ray detectors を基礎として用いた。

この規格の一部が，特許権，出願公開後の特許出願，実用新案権又は出願公開後の実用新案登録出願に抵触する可能性があることに注意を喚起する。経済産業大臣及び日本工業標準調査会は，このような特許権，出願公開後の特許出願，実用新案権又は出願公開後の実用新案登録出願に係る確認について，責任はもたない。

JIS Z 4520 には，次に示す附属書がある。

附属書（**参考**）**JIS** と対応する国際規格との対比表

目　次

日本工業規格　JIS Z 4520 : 2007

ゲルマニウムγ線検出器の試験方法

Test procedures for germanium gamma-ray detectors

序文　この規格は，1989 年に第 1 版として発行された **IEC 60973**，Test procedures for germanium gamma-ray detectors を翻訳し，技術的内容を変更して作成した日本工業規格である。

なお，この規格で点線の下線を施してある箇所は，原国際規格を変更している事項である。変更の一覧表をその説明を付けて，**附属書（参考）**に示す。

1.　適用範囲　この規格は，ゲルマニウムγ線検出器の製造業者及び使用者にとって重要な性能及び特性の試験方法について規定する。主として高分解能γ線スペクトロメトリーに用いるゲルマニウムγ線検出器の試験方法について規定する。

備考　この規格の対応国際規格を，次に示す。

なお，対応の程度を表す記号は，**ISO/IEC Guide 21** に基づき，IDT（一致している），MOD（修正している），NEQ（同等でない）とする。

IEC 60973 : 1989，Test procedures for germanium gamma-ray detectors (MOD)

2.　引用規格　次に掲げる規格は，この規格に引用されることによって，この規格の規定の一部を構成する。これらの引用規格のうちで，発行年を付記してあるものは，記載の年の版だけがこの規格の規定を構成するものであって，その後の改正版・追補には適用しない。発効年を付記していない引用規格は，その最新版（追補を含む。）を適用する。

JIS Z 4001　原子力用語

JIS Z 8103　計測用語

IEC 60333 : 1993，Nuclear instrumentation－Semiconductor charged-particle detectors－Test procedures

IEC 60759 : 1983，Standard test procedures for semiconductor X-ray energy spectrometers

3.　定義　この規格で用いる主な用語の定義は，**JIS Z 4001** 及び **JIS Z 8103** によるほか，次による。

a) **イオン注入** (Ion implantation)　加速したイオンビームを結晶表面に衝突させ，結晶中にイオンを注入する工程。

b) **半値幅** (Full width at half maximum, FWHM)　ピークの最高値の 1/2 における分布の幅。正規分布では標準偏差 σ の 2.35 倍に等しい。

c) **1/10 値幅** (Full width at 0.1 maximum, FW0.1M)　ピークの最高値の 1/10 における分布の幅。FW1/10M ともいう。

d) **1/50 値幅** (Full width at 0.02 maximum, FW0.02M)　ピークの最高値の 1/50 における分布の幅。FW1/50M ともいう。

e) **高純度ゲルマニウムγ線検出器** (High-purity germanium gamma-ray detectors, HPGe) 高純度ゲルマニウム単結晶（不純物濃度は，1×10^{10}cm^{-3} 以下が一般的である。）を用いたγ線検出器。使用時にだけ冷却を行えばよい。

f) **ゲルマニウムγ線検出器** (germanium gamma-ray detectors) 高純度ゲルマニウムγ線検出器，Li ドリフトゲルマニウムγ線検出器等の総称。

4. 構造

4.1 構造一般 ゲルマニウムγ線検出器の素材は，低温（液体窒素の温度程度）で，かつ，高い逆バイアス電圧の条件下でダイオードとして動作するゲルマニウム単結晶である。逆バイアス電圧を印加することによって，検出器の大部分で空乏層が形成される。この条件の下，光子の相互作用によって生成された電子及び正孔は，各電極に向かって空乏層内を移動する。電極に移動した電荷は積分され，吸収された光子エネルギーに比例した大きさのパルス信号を出力する。

一般的にゲルマニウムγ線検出器は，リーク電流及び熱雑音を減少させるため，検出器を冷却し，低温を維持するためのクライオスタットの中に収納する。クライオスタットは，検出器の保護及び適切な環境を保つ役割も果たしている。

通常のゲルマニウムγ線検出器は，ゲルマニウム結晶，前置増幅器，高電圧フィルタ及びクライオスタットが一体構造になっており，前置増幅器と分離して単独のユニットとして検出器の性能を測定することは，一般的ではない。

4.2 検出器の分類 ゲルマニウムγ線検出器は，材質及び幾何学的構造によって分類する。

a) **材質による分類** 材質としては，p 形ゲルマニウム及び n 形ゲルマニウムがあり，高純度のゲルマニウム単結晶を用いた高純度ゲルマニウムγ線検出器が一般的である。

1) **p 形検出器** p 形検出器は，外側に n^+電極（リチウム拡散が一般的であり，不感層の厚さは，0.5～0.8 mm である。）をもった p 形ゲルマニウム結晶［**図 2 a)** 参照］から作る。内側の p^+電極は，ほう素などのイオン注入で作る。空乏層を形成するために，正の高電圧を外側の n^+電極に印加する。

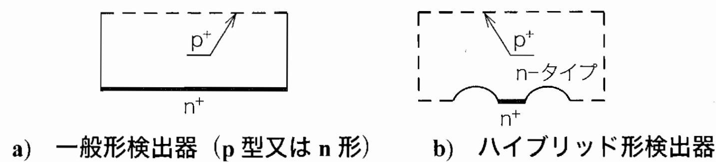
2) **n 形検出器** n 形検出器は，逆電極形検出器ともいい，n 形ゲルマニウム結晶の外側に p^+電極をもつ。この外側の電極は，ほう素のイオン注入［**図 2 b)** 参照］などによって作る。内側の電極は，リチウム拡散で作るのが一般的である。空乏層を形成するために，負の高電圧を外側の p^+電極に印加する。外側の電極は，薄くできるので（約 0.3 µm），低エネルギーX 線検出器としても利用できる。n 形検出器は，p 形検出器と比較して中性子損傷に対する抵抗性に優れている。

b) **幾何学的構造による分類** 一般的な幾何学的構造は，プレーナ形及び同軸形である。これらの違いは電極の構造による。プレーナ形は，並行な面に電極をもつ円板状が一般的である（**図 1** 参照）。同軸形は，一方が閉端の同軸円柱の形をした電極をもつ（**図 2** 参照）。

1) **プレーナ形検出器** プレーナ形構造は，低雑音を可能にする小さい直径の検出器及び／又は小容量の検出器に有効であり，特に低エネルギーX 線に対して高分解能が得られる特長がある。プレーナ形検出器でも大容量で大入射面積のものもあり，外部電極構造を薄くすることによって，低エネルギーX 線も高効率で検出できる。プレーナ形検出器には一般形とハイブリッド形があり，一般形は単純な平行平板構造［**図 1 a)** 参照］をしている。ハイブリッド形は，低静電容量を実現するために，片側の電極を小面積にした構造をもつ［**図 1 b)** 参照］。

2) **同軸形検出器** 同軸形構造のものは，高エネルギーγ線に対しても，比較的高い検出効率が得られるように，検出器を大容量にすることが可能である。

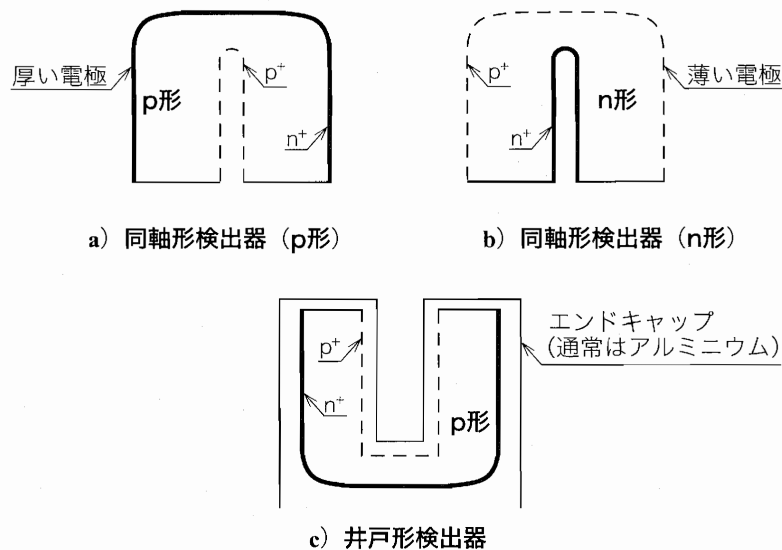
3)　井戸形検出器　井戸形の同軸形検出器は，内側の電極内に測定試料を挿入できる構造をもつ。試料は，ほぼ検出器に覆われる形となる［**図 2 c)** 参照］。



a)　一般形検出器（p 型又は n 形）　　**b)　ハイブリッド形検出器**

備考　点線は薄い p^+電極を表し，太い実線は比較的厚い n^+電極を表す。

図 1　プレーナ形検出器



c）井戸形検出器

備考　点線は薄い p^+電極を表し，太い実線は比較的厚い n^+電極を表す。

図 2　同軸形検出器

5.　一般試験条件　この規格に規定するすべての試験項目を実施する必要はないが，当該試験項目を実施する場合には，ここで規定する方法に従わなければならない。ただし，受渡当事者間の取決めがある場合には，それに従うものとする。

この規格で規定する試験の一般条件は，次による。

a)　最大印加電圧，装置の周囲温度及び環境並びにその他の製造業者が定めた動作条件は，それらの限界を超えると検出器の性能を損なう可能性があるので，限界を超えないで試験することが望ましい。

b)　高電圧電源，増幅器，マルチチャネル波高分析器などの試験に用いる装置は，その非安定性，非直線性又は他の性能によって，検出器の性能試験に有意な影響を与えるものであってはならない。

c)　測定システムの構成部品の変更又はシステムの設定条件（例えば，増幅器の利得）の変更を行った場合には，全測定システムの再校正を行わなければならない。

d)　性能試験の結果は，それぞれの試験終了後及びすべての試験終了後においても，測定精度の範囲内において再現性が保たれることが望ましい。

6. エネルギースペクトル測定 エネルギースペクトルの測定において，受渡当事者間の取決めが特にない場合には，スペクトルピークは，その半値幅において 6 チャネル以上，半値幅内の総計数は，50 000 カウント以上とし，放射線源の位置は，検出器の軸上，エンドキャップ表面から 25.0 cm とする。

6.1 推奨放射線源 検出器及び／又はスペクトル測定システムのエネルギー分解能を測定するときの線源として，**表 1** の放射線源を推奨する。

表 1 推奨放射線源

線源	半減期	エネルギー
^{55}Fe	2.7 年	5.9 keV
^{241}Am	433 年	59.5 keV，26.36 keV. X-rays
^{109}Cd	453 日	22.1 keV（X 線，複合ピーク），88.0 keV
^{57}Co	270 日	122.1 keV，136.5 keV
^{137}Cs	30 年	661.6 keV
^{22}Na	2.60 年	1 274.5 keV
^{60}Co	5.24 年	1 173.2 keV，1 332.5 keV ([1])
^{208}Tl（^{228}Th の系列核種）	1.91 年	2 614.5 keV

注([1]) ^{60}Co の 1 332.5 keV は，同軸形検出器の性能検査に好ましい γ 線である。

マルチ γ 線源として，847～3 600 keV のエネルギー範囲をもつ半減期 77 日の ^{56}Co，及び 122～1 769 keV のエネルギー範囲をもつ半減期 13 年の ^{152}Eu を用いてもよい。ただし，エネルギー分解能測定では，測定システムが 1 チャネル当たりの eV 又は keV の単位でエネルギー校正していることが前提条件である。

エネルギー校正は，測定システムの非直線性に起因する諸問題を低減するために，対象とするピークに十分に近いエネルギーの複数の γ 線を用いて行うとよい。例えば，^{60}Co の 1 173.2 keV 及び 1 332.5 keV の 2 本の γ 線がこの目的に適しているし，単色 γ 線を放出する ^{137}Cs の場合は，^{207}Bi (569.7 keV)，^{54}Mn (835 keV) などを併せて利用するとよい。

6.2 試験器の接続方法 **図 3** に示すように，検出器に前置増幅器，主増幅器及びマルチチャネル波高分析器を接続する。

検出器と前置増幅器とは一体構造となっていることが多い。主増幅器による波形整形は，検出器の最高性能を得る条件に設定することが一般的であり，用いた主増幅器の波形整形の方法及びパラメータは，個々のエネルギー分解能の測定値又はその仕様とともに示さなければならない。測定システムに接続するパルス発生器（**IEC 60333** を参照。）は，他のピークに悪影響を与えず（例えば，アンダーシュートが要因となる。），かつ，検出効率測定の場合の不感時間補正に大きな誤差を生じないという条件で，γ 線測定と同時に用いてもよい。

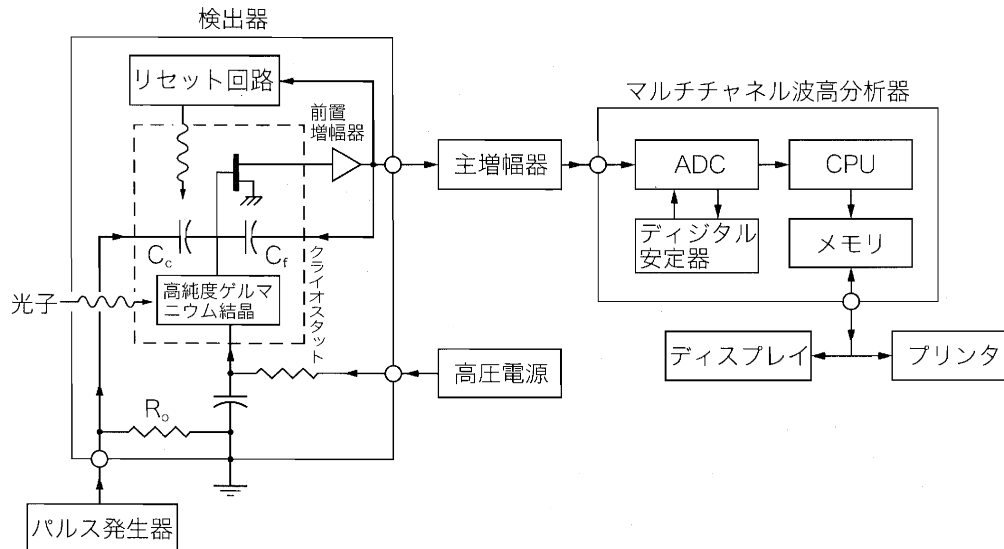


図 3　一般的なゲルマニウム γ 線スペクトロメータシステムのブロック図

6.3　ピーク面積の求め方　ピーク面積（ピークの正味計数値）の求め方には，チャネルごとの計数値を積算する方法，ピーク関数適合法など多くの方法があるが，ピーク面積の計算結果の確認が容易にできるように，この規格では計数値積算法を規定する。計数値積算法にも，ベースライン面積の求め方は幾つかあるが，ここでは，次に示す二つの方法を規定する。いずれの方法を用いてもよいが，どの方法で試験を行ったかを明示しなければならない。

参考　**a)** の方法は，高分解能のゲルマニウム γ 線検出器の場合には，ベースライン直線の引き方によって精度が悪くなる。また，チャネルごとのベースライン計数を求めなければならないなどの煩雑性もあり，**b)** の方法が一般的である。

a)　チャネルごとのベースライン計数を積算してベースライン面積を算出する方法で，手順は次による。

1)　**図 4** に示すように，チャネル番号 X を横軸に，そのチャネルにおける計数値 N_x の対数を縦軸にとって，パルス波高分布をプロットする。この片対数プロット上のピークの両側を通る直線（直線 a－d）を引いて，ピークの下のベースラインを近似する。ピークの低エネルギー側及び高エネルギー側付近の 10 点程度の平均値をベースラインとして用いてもよい。

2)　ピークのデータ点を通る滑らかな曲線を描き，その曲線がピークの両端のすそでベースラインと交わるまで延ばす（曲線 A－B 及び曲線 C－D）。

3)　ピークの曲線と交わる 2 点の間の直線（A－D）の下の面積をベースライン面積とする。

4)　全ピーク面積 A_t は，ベースラインの直線と交わる 2 点間の各チャネルとの計数を積算して求める。

$$A_t = \sum_{X=A}^{D} N_X \quad \cdots\cdots (1)$$

ここに，　N_x：　チャネル X における計数

5)　同様にベースライン面積 A_b は，チャネル X のベースライン計数 B_x を積算して求める。

$$A_b = \sum_{X=A}^{D} B_X \qquad (2)$$

6) ピーク面積 A は，式 (3) による。

$$A = A_t - A_b \qquad (3)$$

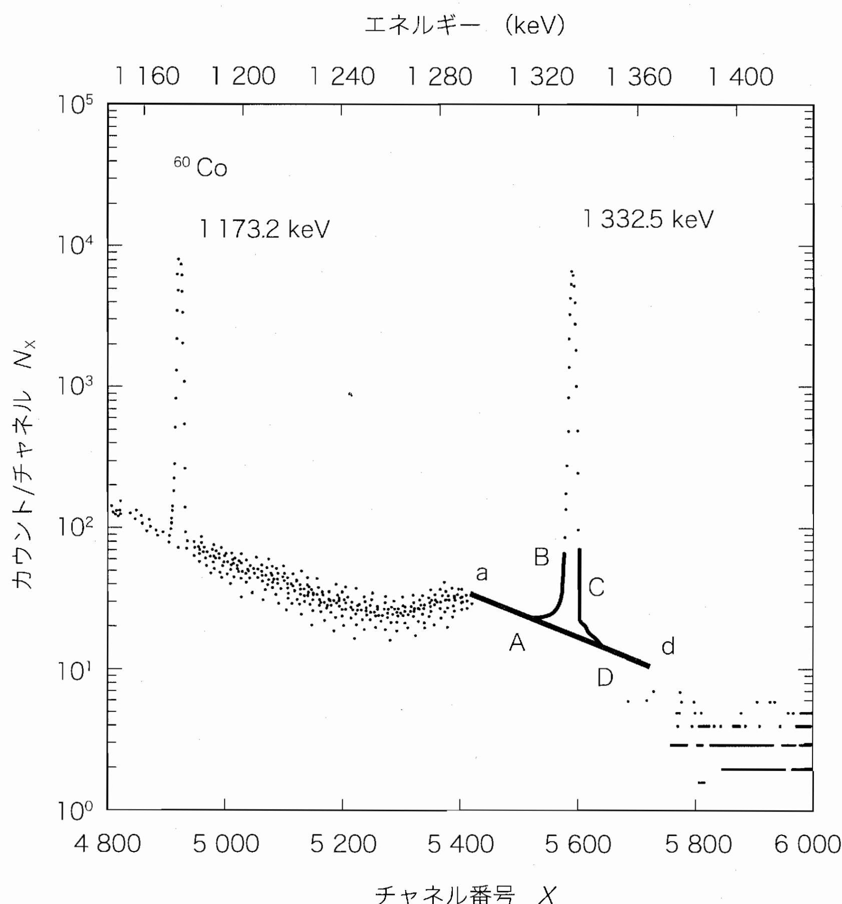


図 4 チャネルごとのベースライン計数を積算してベースライン面積を算出する方法

b) ベースライン面積を台形面積として近似する方法で，手順は次による。

1) **図 5** に示すように，ピークの下のベースラインを直線とみなす。

2) ピークの領域（L～H）をピーク両側の端から数チャネル広く設定する。

3) 全ピーク面積 A_t は，各チャネルの計数値を積算する。

$$A_t = \sum_{X=L}^{H} N_X \qquad (4)$$

ここに，　N_X：　チャネル X における計数値

4) ピーク領域内のベースライン面積 A_b は，式 (5) による。

$$A_b = \frac{1}{2}(H - L + 1)(N_L + N_H) \qquad (5)$$

ここに，　N_L：　チャネル番号 L における計数値
　　　　　N_H：　チャネル番号 H における計数値

N_L 及び N_H は，統計変動を小さくするため前後の数点（$L \pm k$，$H \pm k$：k＝1～5）の平均値を用いてもよい。ただし，ピーク中心を $\hat{X}$ とすると，$L_2 + k \leqq \hat{X} - 1.5\text{FWHM}$ 及び $H_2 - k \geqq \hat{X} + 1.5\text{FWHM}$ でなければならない。

5)　ピーク面積 A は，式 (3) による。

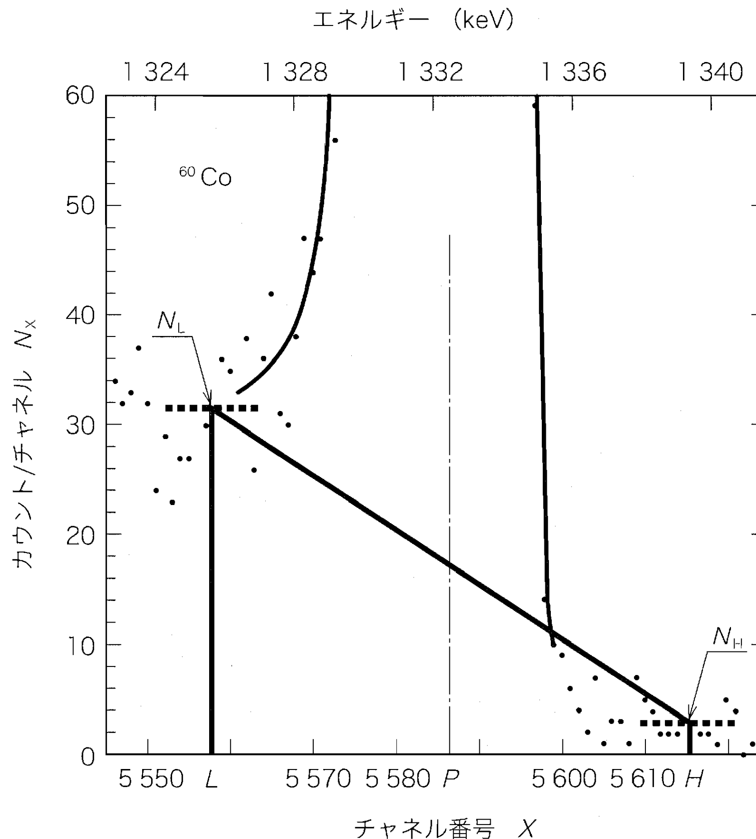


図 5　ベースライン面積を台形面積として近似する方法

6.4　ピークチャネルの求め方　各チャネルごとに，ベースライン計数を差し引いたチャネル当たりの計数値 $N_x - B_x$ を求める。単色エネルギーのスペクトルピークの最大値に相当するチャネル $\hat{X}$ を，補間によって求める。例えば，ピーク計数値の半分を超えるピークの対称な部分における計数の加重平均を式 (6) によって求める方法が簡便である。

$$\hat{X} = \sum X(N_X - B_X) / \sum (N_X - B_X) \quad \cdots\cdots (6)$$

6.5　ピークの半値幅，1/10 値幅及び 1/50 値幅の求め方　X に対して $N_X - B_X$ を直線プロットし，ピーク最大値の 1/2，1/10 及び 1/50 を決定する。ピークの半値幅，1/10 値幅及び 1/50 値幅のチャネル数 $\varDelta N_s$ を補間によって決定する（**図 6** 参照）。これらの比（1/10 値幅／半値幅及び 1/50 値幅／半値幅）は，しばしばピーク形状の性能の指標となる。

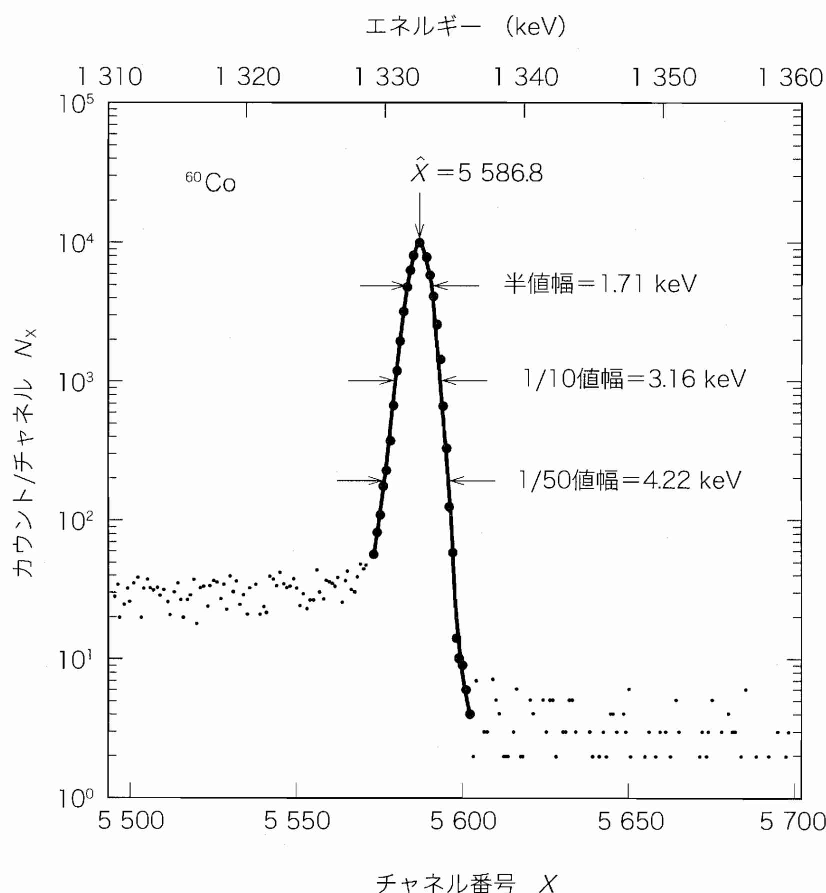


図 6　1 332.5 keV γ 線 (^{60}Co) ピークの半値幅，1/10 値幅及び 1/50 値幅

6.6　ピーク対コンプトン比の求め方　^{60}Co の 1 332.5 keV の γ 線に対して 1 040～1 096 keV の比較的平たんな部分をコンプトン連続領域として，その平均の計数値 $\overline{N}_c$ を決定する。これらの領域は，コンプトン端を避けている。ピーク対コンプトン比は，$\hat{X}$ チャネルにおけるピーク最大計数値 N_X の $\overline{N}_c$ に対する比として定義する（**図 7** 参照）。

ピーク対コンプトン比は，検出器の形状，マウント方法及びクライオスタットの構造，計数効率並びにエネルギー分解能に依存する検出器の性能指標の一つである。ピーク対コンプトン比は，他の条件を変えなければエネルギー分解能に反比例し，一般的に計数効率の増大に伴って大きくなるが，その効果は検出器の形状によって限界がある。

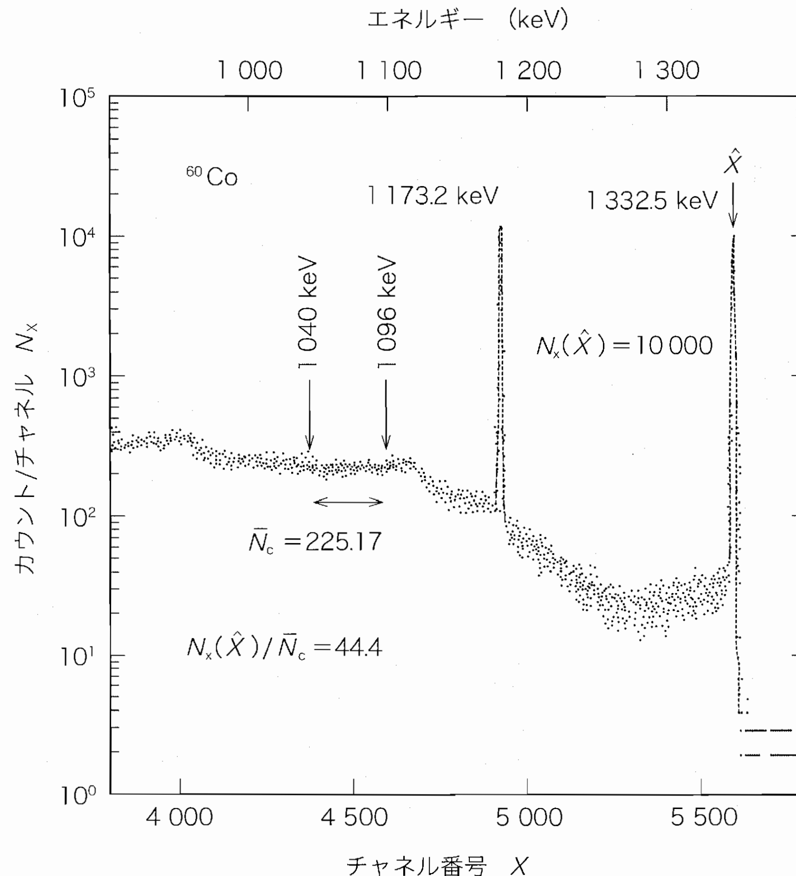


図 7　1 332.5 keV γ 線 (^{60}Co) に対するピーク対コンプトン比 (P/C) の決定

6.7　エネルギー分解能の求め方　対象とする γ 線のピークと二番目の γ 線のピークが一つのスペクトル上にあって，エネルギー校正のために，それぞれのピーク中心の $\hat{X}_1$ 及び $\hat{X}_2$ を決定しておくことが望ましい（**6.4** 参照）。二番目のピークは，校正したパルス発生器からのパルスでもよい（パルス発生器の校正は，**IEC 60333** の **4.1** を参照。）。

N_x-B_x をプロットし，ピークの半値幅のチャネル幅 ΔN_s を補間によって決定する。エネルギーの単位で表されるエネルギー分解能 ΔE_s は，式 (7) による。

$$\Delta E_s=\frac{E_1-E_2}{\hat{X}_1-\hat{X}_2}\Delta N_s \qquad (7)$$

ここに，　E_1：　対象とするピークのエネルギー

$\hat{X}_1$：　対象とするピークの中心チャネル

E_2：　二番目のピークのエネルギー

$\hat{X}_2$：　二番目のピークの中心チャネル

エネルギー分解能の測定値又は仕様を記載する場合には，用いた増幅器の波形整形のタイプ及びその条件（例えば，波形整形時間）を明示しなければならない。

特に高計数率でエネルギー分解能を測定した場合には，計数率及び用いた前置増幅器の性能（最大計数率とエネルギーとの積，maximum count rate-energy product：以下，CREP という。）も明示しなければならない。CREP は，前置増幅器がその直線応答レンジの範囲内で正常に動作するエネルギー入力の最大値に

相当する。例えば，抵抗フィードバック前置増幅器において，最大 CREP はフィードバック抵抗及び最大フィードバック電圧によって決まる。CREP は，式 (8) で定義する。

$$\mathrm{CREP} = \sum_{E} E \times r_E \quad (\mathrm{keV} \times \mathrm{s}^{-1}) \qquad (8)$$

ここに，　r_E：　エネルギーE (keV) における計数率 (s^{-1})

6.8　総合雑音及び検出器の寄与の求め方　γ 線スペクトル及びパルス発生器によるピークを測定し，γ 線ピークの半値幅ΔE_s 及びパルス発生器のピークの半値幅ΔE_r を求める。雑音測定にパルス発生器を用いることについて，より詳細な情報が必要なときには **IEC 60333** を参照する。ΔE_r はスペクトル測定システムの総合雑音である。電気的雑音以外のすべてに起因する γ 線ピークの半値幅への寄与 ΔE_0 は，式 (9) による。

$$\Delta E_0 = (\Delta E_s{}^2 - \Delta E_r{}^2)^{\frac{1}{2}} \qquad (9)$$

計数率特性の影響を受けない低い計数率でのデータであれば，ΔE_0 は主として検出器の電荷生成及び電荷収集の過程に起因するものであり，検出器の重要な特性を示す。

6.9　ピークの非対称性の求め方　計数率特性によるピークの非対称性への影響が無視できるように，1 000 s^{-1} 以下の低い計数率で測定することが望ましい。ピークの非対称性の求め方は，次による。

X 軸に対して ($N_x - B_x$) を片対数でプロットし，ピークチャネル $\hat{X}$ の頂点から X 軸に垂線を引く。ピークの 1/10 の高さにおける低エネルギー側の点から中心線までの間隔 L を測る（**図 8** 参照）。高エネルギー側においても，これに相当する間隔 H を測る（**図 8** 参照）。H/L の比をピーク非対称性とし，そのときに用いた γ 線エネルギーも同時に示す。

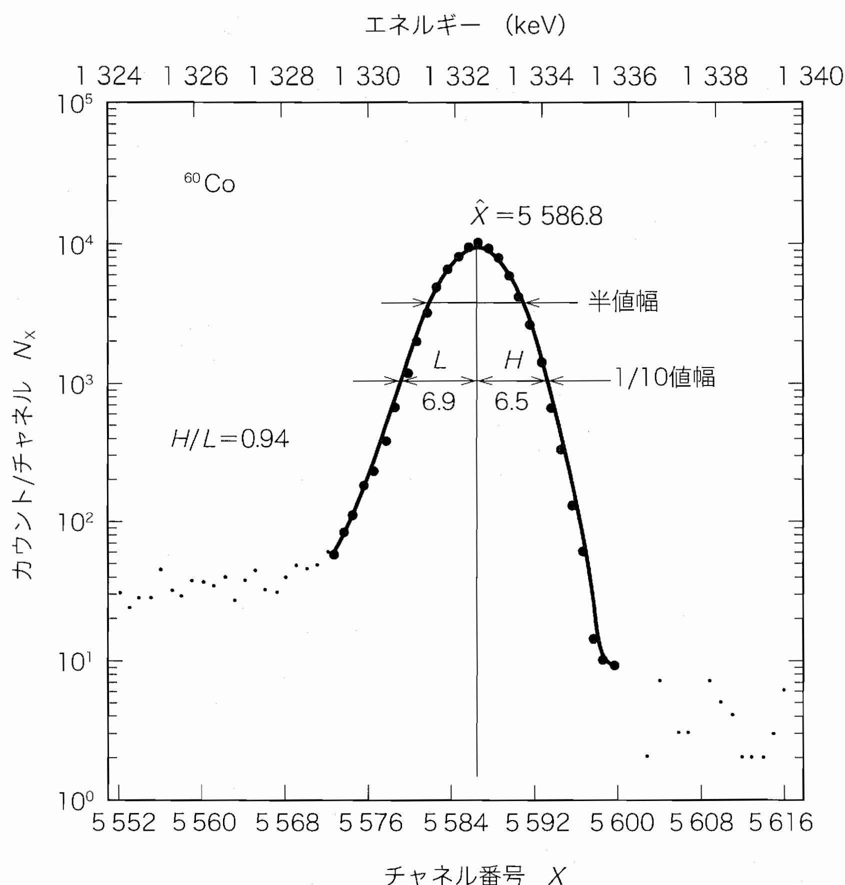


図 8 ピークの非対称性 *H/L* 比の求め方

6.10 井戸形検出器のエネルギー分解能の求め方 井戸形検出器のエネルギー分解能測定は，井戸底部中心から軸上 1 cm 程度離れた位置に，点線源を置いて行われなければならない［**図 2 c)** 参照］。電極付近の電場が低い検出器は，その近傍で電荷収集能力が劣るため，井戸内部の線源に対してのエネルギー分解能の性能が劣る。この点を除けば，測定方法及び線源の核種は，他のゲルマニウム γ 線検出器と同じである。

6.11 推奨エネルギー エネルギー分解能を試験する場合には，検出器が対応するエネルギー範囲に応じて，選択した特有のエネルギーについて測定することが望ましい。エネルギー範囲における推奨エネルギー及び核種は，**表 2** による。

表 2 推奨エネルギー

エネルギー範囲	推奨エネルギー及び核種
1 MeV 以上	1 332.5 keV (^{60}Co)
400 keV～1 MeV	661.6 keV (^{137}Cs)
70 keV～400 keV	122.1 keV (^{57}Co)
70 keV 未満	5.9 keV (^{55}Fe), 22.1 keV (^{109}Cd), 59.5keV (^{241}Am)

備考 これより広い範囲のエネルギーについては，**6.1** を参照。

7.　計数効率の求め方　全エネルギーピークに対する計数効率は，ゲルマニウムγ線検出器の有効体積及び形状，検出器に対する線源の配置並びに検出器周辺の構造に依存する。計数効率は，検出器だけでなく周辺構造を含む検出部全体の効率として定義する。

この規格では，検出器に対する線源の配置として，次の二つを規定する。

a)　検出器エンドキャップ表面中心から 25.0 cm の距離に点線源を置く方法。

b)　井戸形検出器の井戸底部中心から軸上 1.0 cm に点線源を置く方法。

これらの配置は代表的なものであり，可能なすべての配置に対応するものではない。しかしながら，この条件下での測定は，検出器の性能試験，比較及び選択のときに基準となる。

計数効率を性能として示す場合には，どの方法で測定を行ったかを明示しなければならない。

なお，実際の測定試料を模擬した体積線源を用いて計数効率を求めてもよいが，その場合は，模擬した体積線源の形状などの仕様を明示しなければならない。

7.1　点線源に対する 25.0 cm 距離での効率

7.1.1　全エネルギーピーク絶対効率の求め方　**図 3** に示すように，付随する電子機器を検出器に接続し，校正した ^{60}Co 線源を用いてスペクトルを測定する。線源の中心からエンドキャップ表面中心までの距離は，25.0 cm とする。全エネルギーピーク絶対計数効率 E_a は，全エネルギーピークの計数値 A の計数時間（ライブタイム）中に線源から放出された 1332.5 keV のγ線の数 N_s に対する比とする。

$$E_a = A/N_s \quad \cdots\cdots (10)$$

計数時間は，γ線ピークのエネルギーより 5 %程度高い位置に，既知の一定のパルス発生率をもつパルス発生器を用いてピークを発生させ，その面積から決定してもよい。エンドキャップに線源を近づけたときの計数効率測定には，この方法が有効である。

7.1.2　全エネルギーピーク相対効率の求め方　線源と検出器との距離 25.0 cm（**7.1.1** に規定）における 3 インチ×3 インチ (76 mm×76 mm) NaI (Tl) シンチレーション検出器の計数効率との比で表すゲルマニウムγ線検出器の効率 E_{rel} は，式 (11) による。

$$E_{rel} = E_a/E_{NaI} \quad \cdots\cdots (11)$$

ここに，　E_a：　式 (10) による全エネルギー計数効率

E_{NaI}：　3 インチ×3 インチ (76 mm ×76 mm) NaI (Tl) シンチレーション検出器の全エネルギー計数効率

ただし，線源と検出器エンドキャップとの距離 25.0 cm における ^{60}Co から放出される 1332.5 keV のγ線に対する E_{NaI} の値は，1.20×10^{-3} である。

7.2　井戸形検出器のγ線計数効率の求め方　井戸形検出器のγ線計数効率の求め方は，**7.1** に規定する方法が一般的であるが，井戸内部に線源を挿入して測定する方法もある。いずれの方法を用いてもよいが，計数効率を性能として示す場合には，どの方法で測定を行ったかを明示しなければならない。

井戸内部に線源を挿入して測定する方法では，線源が井戸形検出器［**図 2 c)**］のゲルマニウム結晶に囲われるため，γ線に対して高い計数効率を示す。また，これに伴い，同時に放出された 2 本のγ線の信号が加算される確率が，エンドキャップの外側に線源を置いた配置と比較して，格段に大きくなり，同時放

出γ線がスペクトル中で明らかなサムピークとして現れる。サムピークは，2 本のγ線の全エネルギー吸収が同時に起こったことを示す。

井戸内部に線源を挿入して測定する方法は，次による。

a) 2 本の同時γ線のうちの一つについてみると，その全エネルギーとして検出されるγ線の数は，全エネルギーピークAの計数とサムピークA_sの計数の和に等しい。精度の高い測定においては，一つの同時放出γ線の検出γ線の数は，$A+A_s$で表さなければならない。

b) 井戸形検出器における真の同時サム効果は，検出器の計数効率性能に対して特に重要な事項である。検出器の絶対効率が高くなるにつれて，サムピークによる全エネルギーピークAの計数の減少の割合が大きくなり，A_s/Aの比は大きくなる。そのため，全エネルギーピークの計数だけを絶対効率の算出に用いる場合，実際の効率が高くなるのに伴って，計数効率を低く算出してしまう結果となる。二つの同時γ線の一方を用いて検出器の計数効率を算出する場合，$A+A_s$を，そのγ線に相当する全エネルギーの計数としなければならない。

c) 井戸形検出器の計数効率 ([2]) は，エンドキャップ井戸部の底面の上方 1.0 cm に最大 2.0 mm 以下の ^{60}Co 点線源を置き，**6.2** に規定する方法で測定を行うことが望ましい。偶発同時計数は，計数率及び増幅器の波形整形時間の制御及び／又はパルスのパイルアップ除去を行うことによって，無視又は補正できるようにしなければならない。^{60}Co の 1 332.5 keV のγ線は，1 173.2 keV のγ線とのサム効果によって，2 505.7 keV のサムピークとなる。

注([2]) 井戸形検出器の計数効率を表す指標の一つにゲルマニウム結晶の有効体積 (cm^3) があるが，使用者は有効体積を確認することはできない。また，信頼性の高い計数効率の指標でもないため，ゲルマニウム結晶の有効体積 (cm^3) は，検出器の性能表示としては不適切である。

d) ^{60}Co の 1 332.5 keV 及び 2 505.7 keV のピーク面積は，**6.3** の方法に従って決定することが望ましい。井戸形検出器の計数効率 (W) は，式 (12) による。

$$W=\frac{A+A_s}{N_s} \quad \cdots\cdots (12)$$

ここに，
A： 1 332.5 keV のピーク面積
A_s： 2 505.7 keV サムピークのピーク面積
N_s： 計数時間中に線源から放出される 1 332.5 keV のγ線の数

8. 入射窓厚さの指標 入射窓厚さ（検出器不感層，クライオスタット，エンドキャップなど）は，^{133}Ba の 31.0 keV，35.0 keV 及び 79.6 keV/81.1 keV の 3 本のピーク面積を測定し，それらの比を入射窓厚さ指標として評価する。^{109}Cd の 22 keV 及び 88 keV 又は，^{155}Eu の 43 keV 及び 86.5 keV のピーク面積の比を用いてもよい。いずれの場合も線源の自己吸収及び容器による吸収が，無視できることを確認していなければならない。

蛍光 X 線に基づいた入射窓厚さ指標は，薄い入射窓の測定に用いる。その指標については，**IEC 60759** に規定しており，厚さ指標は，標準ガラスの蛍光 X 線に基づいている。

このガラスは Si，Ba，Ca，Li，Mg，Zn 及び B の酸化物を含んでいる。^{55}Fe 線源によって蛍光 X 線が発生すると，1〜5 keV の範囲の X 線が多数放出される。これらの X 線と線源から放出され，コヒーレント

に後方散乱した 5.9 keV の X 線との比を入射窓厚さ指標に用いる。

9. タイミング ゲルマニウムγ線検出器のタイミングに関する能力を測定する有効な方法は，^{22}Na から正反対方向に放出される 2 本の 511 keV 消滅放射線を検出する同時計測に基づくものである。そのほかに ^{60}Co からカスケードに放出されるγ線を同時計測する方法もある。測定対象のゲルマニウムγ線検出器からのスタート信号と他の高速検出器から得られる遅延ストップ信号とが必要である。時間・波高変換器を用いてスタート信号とストップ信号との時間差の分布を計測し，システムの時間分解能を求める。高速検出器及びシステムの電子回路が高速であれば，そのゲルマニウムγ線検出器の時間分解能に関する情報を得ることができる。ただし，タイミングの測定は，システム全体及びその調整に依存するため，タイミング測定の結果は，必ずしも検出器だけの特性ではない。

9.1 時間分解能の計測システム **図 9** にゲルマニウムγ線検出器の時間分解能を測定する代表的なシステムを示す。ストップ信号は比較的高速な光電子増倍管にマウントした高速プラスチックシンチレータからの信号である（総合立上がり時間は 5 ns 以下）。光電子増倍管からの信号は，コンスタントフラクション・ディスクリミネータ（constant fraction timing discriminator：以下，CFTD という。）を通り，遅延回路で数 *n* 秒遅延されてから時間・波高変換器 (TAC) のストップ側に入力する。そこでは，時間軸校正のために，幾つかの校正した時間遅延回路が必要である。

ゲルマニウムγ線検出器からの信号を，前置増幅器の出力段階で二つに分岐する。

一つは，前置増幅器の出力段階で観測できる最も速い立上がり時間にほぼ近い微分時定数をもつ高速波形整形増幅器に送られ，その出力信号は，CFTD に送られる。CFTD における設定パルス波高レベルとしては 20 %が望ましく，また，波形整形による遅延は，前置増幅器の出力で観測される最も速い信号の立ち上がり時間の 1.5 倍程度であることが望ましい。このパラメータの組合せが，立上がり時間とパルス波高との変動に起因するタイミングの不確かさを最小限とする。

もう一方は，増幅器及びシングルチャネルアナライザ(SCA)に送られ，マルチチャネルアナライザのゲート信号となる。^{22}Na 線源からの陽電子消滅放射線は，SCA によって 511 keV を中心に 10 %のウィンドウ幅に設定することが望ましい。

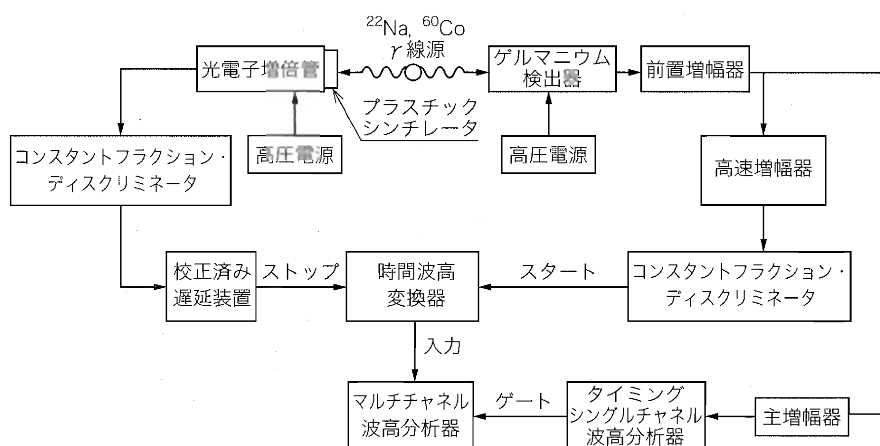


図 9 タイミング及び時間スペクトルの測定システム

9.2　時間分解能の求め方　**図 9** に，γ 線同時計数の時間スペクトルが得られる測定システムの例を示す。また，代表的なスペクトルを**図 10** に示す。半値幅の間のチャネル数は，少なくとも 6 点とし，半値幅内の総計数値は，少なくとも 4 000 カウントとする。少なくとも二点の校正した遅延時間を用いて時間軸を校正した後，半値幅及び 1/10 値幅をナノ秒の単位で決定する。時間分解能試験の再現性を確認するために，次のパラメータを記録しなければならない。

a)　ゲルマニウム γ 線検出器及びシンチレーション検出器の印加電圧

b)　プラスチックシンチレータ系の高速波形整形増幅器及びゲルマニウム γ 線検出器系増幅器の波形整形条件

c)　ストップ信号の遅延時間

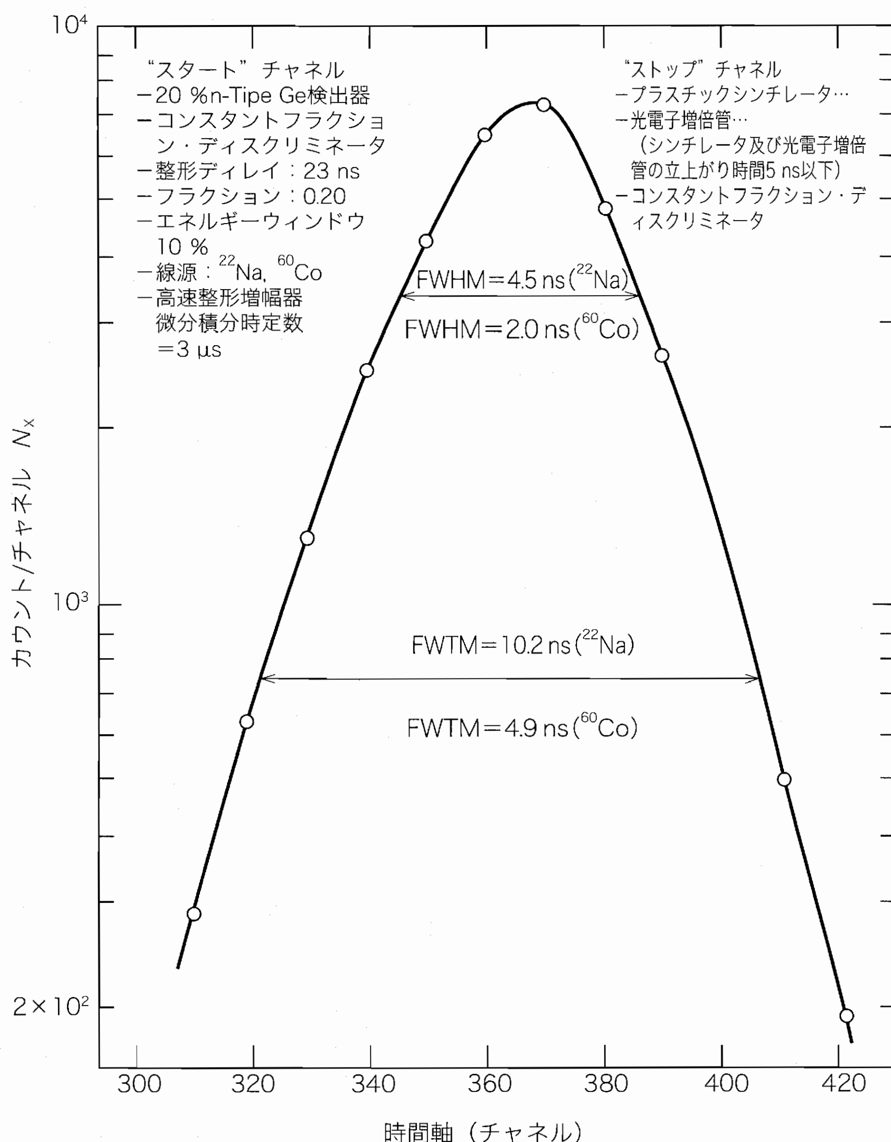


図 10　ゲルマニウム γ 線検出器の時間分解能（例）

10. 温度サイクル

10.1 温度サイクル可能な検出器 温度サイクル可能な検出器（一般的に高純度ゲルマニウムγ線検出器）は，ポータブル検出器及び液体窒素の供給が確実でない場合などには，特に有用である。温度サイクル可能な検出器であっても，クライオスタットと一体化されたものの一部として真空に保たれる。温度サイクル可能な検出器は，液体窒素温度と室温とのサイクル及び室温における長時間の保管をしても，保証期間中は検出器の性能を維持することを，製造業者は保証しなければならない。

10.2 アニール可能な検出器 アニール可能な検出器は，放射線（特に高速中性子）による損傷を補修するため，ある一定時間，特定の温度に保持しても性能の劣化がないように設計した検出器である（**10.1** 参照）。クライオスタット，検出器及びマウント方法は，アニール（例えば，120 ℃，24 時間）に適応できるものでなければならない。放射線損傷がない状態では，検出器は定められた性能を超えて劣化することなく，アニールに耐えるものであることが望ましい。

適切なアニールによって，放射線損傷を受けた高純度ゲルマニウムγ線検出器をほぼ損傷を受ける前の状態に回復させることができる。p 形同軸形検出器と比較して，n 形同軸形検出器は，放射線損傷に対して感度が低く，かつ，アニール操作による効率の劣化も小さい。

附属書（参考）JIS と対応する国際規格との対比表

JIS Z 4520 : 2007　ゲルマニウムγ線検出器の試験方法					**IEC 60973** : 1989　ゲルマニウムガンマ線検出器の試験手順		
(Ⅰ) **JIS** の規定		(Ⅱ) 国際規格番号	(Ⅲ) 国際規格の規定		(Ⅳ) **JIS** と国際規格との技術的差異の項目ごとの評価及びその内容 表示箇所：本体 表示方法：点線の下線		(Ⅴ) **JIS** と国際規格との技術的差異の理由及び今後の対策
項目番号	内容		項目番号	内容	項目ごとの評価	技術的差異の内容	
1. 適用範囲	ゲルマニウムγ線検出器の試験方法について規定。	**IEC 60973**	1 2	**JIS** に同じ。	IDT	－	－
2. 引用規格	**IEC 60333** **IEC 60759**		－	**JIS** に同じ。	IDT	**IEC** 規格に引用規格の箇条はないが，PREFACE 部分に引用規格の説明がある。	－
	JIS Z 4001 **JIS Z 8103**			－	MOD/追加	用語規格の追加。	**IEC** 規格は，本体で用語の定義を規定。**JIS** は，引用規格も使用して規定しているため。
3. 定義	**JIS Z 4001** 及び **JIS Z 8103** によるほか，六つの用語の定義を規定。		3	記号及び定義	MOD/削除	**IEC** 規格は，記号と用語の定義を規定しているが，本体で使用されていない記号及び用語もある。 **JIS** は，記号及び使用されていない用語を削除。	技術的差異はない。
4. 構造 4.1 構造一般 4.2 検出器の分類	 ゲルマニウムγ線検出器の構造。 検出器の分類。		4 4.1 4.2 4.3	はじめに γ線の相互作用 Ge 検出器 検出器の種類 **JIS** とほぼ同じ。	 MOD/削除 MOD/削除 MOD/変更	**IEC** 規格の 4 は，試験方法と全く関係のない記載内容である。 **JIS** は，4.1 及び 4.2 を削除。4.3 だけを修正の上規定。	技術的内容の基本的修正ではない。
5. 一般試験条件			5	**JIS** に同じ。	IDT	－	－
6. エネルギースペクトル測定			6	**JIS** に同じ。	IDT	－	－
6.1 推奨放射線源			6.1	**JIS** に同じ。	IDT	－	－
6.2 試験器の接続方法			6.2	**JIS** に同じ。	IDT	－	－

(Ⅰ) JIS の規定		(Ⅱ) 国際規格番号	(Ⅲ) 国際規格の規定		(Ⅳ) JIS と国際規格との技術的差異の項目ごとの評価及びその内容 表示箇所：本体 表示方法：点線の下線		(Ⅴ) JIS と国際規格との技術的差異の理由及び今後の対策
項目番号	内容		項目番号	内容	項目ごとの評価	技術的差異の内容	
6.3 ピーク面積の求め方			6.3	JIS とほぼ同じ。	MOD/選択	JIS は，IEC 規格の方法とは異なる方法を追加し，いずれの方法を用いてもよいと規定。	現システムでは，JIS で追加した試験方法が一般的であるため。 IEC 規格見直しのとき，改正を提案する予定。
6.4 ピークチャネルの求め方			6.4	JIS に同じ。	IDT	−	−
6.5 ピークの半値幅，1/10 値幅及び 1/50 値幅の求め方			6.5	JIS に同じ。	IDT	−	−
6.6 ピーク対コンプトン比の求め方			6.6	JIS に同じ。	IDT	−	−
6.7 エネルギー分解能の求め方			6.7	JIS に同じ。	IDT	−	−
6.8 総合雑音及び検出器の寄与の求め方			6.8	JIS に同じ。	IDT	−	−
6.9 ピークの非対称性の求め方			6.9	JIS とほぼ同じ。	MOD/追加	JIS は，計数率の数値に，“1 000 s^{-1} 以下の”を追加。	試験方法に具体性をもたせたため。
6.10 井戸形検出器のエネルギー分解能の求め方			6.10	JIS に同じ。	IDT	−	−
6.11 推奨エネルギー			6.11	JIS とほぼ同じ。	MOD/追加	JIS は，推奨エネルギー値に，59.5 keV (^{241}Am) を追加。	一般的に使用されている数値であるため。
7. 計数効率の求め方			7	JIS とほぼ同じ。	MOD/削除 MOD/追加	IEC 規格に記載の標準的なマリネリビーカを削除。 体積線源の仕様について許容する文章を追記した。	標準的なマリネリビーカが，国内には存在しないため。 IEC 規格見直しのとき，改正を提案する予定。 JIS で追加した試験方法が一般的であるため。また，実質的な試験方法の差異はない。

(Ⅰ) **JIS** の規定		(Ⅱ) 国際規格番号	(Ⅲ) 国際規格の規定		(Ⅳ) **JIS** と国際規格との技術的差異の項目ごとの評価及びその内容 表示箇所：本体 表示方法：点線の下線		(Ⅴ) **JIS** と国際規格との技術的差異の理由及び今後の対策
項目番号	内容		項目番号	内容	項目ごとの評価	技術的差異の内容	
7.1 点線源に対する 25.0 cm 距離での効率			7.1	**JIS** に同じ。	IDT	−	−
7.2 井戸形検出器のγ線計数効率の求め方			7.2	**JIS** とほぼ同じ。	MOD/選択	**JIS** は，**IEC** 規格の方法とは異なる方法（7.1 に規定の方法）を追加し，いずれの方法を用いてもよいと規定。	**JIS** で追加した試験方法が一般的であるため。
−	−		7.3	標準マリネリビーカを用いたときのγ線計数効率。	MOD/削除	−	7.の（Ⅴ）参照。
8. 入射窓厚さの指標			8	**JIS** とほぼ同じ。	MOD/変更 MOD/選択	^{133}Ba のエネルギーに誤りがあったので変更した。 指標とし ^{155}Eu を追加し，選択可能とした。	**IEC** 規格見直しのとき，改正を提案する予定。 一般的に有用な指標であるため。
9. タイミング			9	**JIS** とほぼ同じ。	MOD/選択	^{60}Co による試験方法を追加し，選択可能とした。	一般的に有用な試験方法であるため。
9.1 時間分解能の計測システム			9.1	**JIS** に同じ。	IDT	−	−
9.2 時間分解能の求め方			9.2	**JIS** に同じ。	IDT	−	−
10. 温度サイクル			10	**JIS** に同じ。	IDT	−	−
10.1 温度サイクル可能な検出器			10.1	**JIS** に同じ。	IDT	−	−
10.2 アニール可能な検出器			10.2	**JIS** に同じ。	IDT	−	−
−	−		11	低バックグラウンド・ゲルマニウムγ線検出器	MOD/削除	**IEC** 規格の記載内容は，一般常識事項であり規定内容の記載がないので削除。	技術的内容に差異はない。

JIS と国際規格との対応の程度の全体評価：MOD

備考1. 項目ごとの評価欄の記号の意味は，次のとおりである。

— IDT………………技術的差異がない。

— MOD/削除………国際規格の規定項目又は規定内容を削除している。

— MOD/追加………国際規格にない規定項目又は規定内容を追加している。

— MOD/変更………国際規格の規定内容を変更している。

— MOD/選択………国際規格の規定内容と別の選択肢がある。

2. JIS と国際規格との対応の程度の全体評価欄の記号の意味は，次のとおりである。

— MOD ……………国際規格を修正している。

JIS Z 4520 : 2007

ゲルマニウムγ線検出器の試験方法
解　説

この解説は，本体及び附属書に規定・記載した事柄，並びにこれらに関連した事柄を説明するもので，規格の一部ではない。

この解説は，財団法人日本規格協会が編集・発行するものであり，この解説に関する問合せは，財団法人日本規格協会へお願いします。

1.　制定の趣旨・経緯

ゲルマニウムγ線検出器の試験方法に関する国内規格として，**JIS Z 4520** : 1979（ゲルマニウムγ線検出器の試験方法）が，主に **IEC 60430** : 1973, Test procedures for germanium gamma-ray detectors を基礎として，1979 年に制定されたが，国内に当該機器製造業者がないという理由で 1995 年に廃止になった。

しかしながら，ゲルマニウムγ線検出器は広く使用されており，また，この規格は，単に製造業者が実施する性能試験を規定するものでなく，製造業者，輸入販売業者，使用者などが共通の試験方法をもつことによって，機器の性能を同じ物差しで評価できることにある。このことは，国内製造業者がいない我が国でも重要な規格であり，新たに制定することとした。制定に当たっては対応国際規格として，**IEC 60973** : 1989, Test procedures for germanium gamma-ray detectors との整合を図った。

なお，**IEC 60973** : 1989 は，既に **IEC** の技術委員会 **IEC/TC45** で見直しが進められているが，この規格の原案作成時点では，まだ Ed.2 の段階であり，発行まではしばらく期間を要することから，現行 **IEC** 規格 **IEC 60973** : 1989 を対象として整合を図った。

2.　審議中に特に問題となった事項

a)　IEC 規格との整合について　対応国際規格の **IEC 60973** : 1989 には，**JIS** の書式となじまない部分（例えば，“引用規格”の規定がない，“目的”の条項がある，規格本体に使用しない“記号”又は“用語の定義”が多数規定されている。）などがあり，書式は **JIS** の形式でまとめた。**IEC 60973** : 1989 には“γ線の相互作用”及び“低バックグラウンド検出器”など，規定に関する記述ではなく，教科書的な説明の記述がある。これらの項目については，規格本体から削除しても規格として技術的な内容に変更はないので，この解説に記載した。

IEC 60973 : 1989 では，マリネリビーカによる効率の求め方の記述があるが，国内で使用されているマリネリビーカとは，形状が異なる。また，国内で広く用いられている文部科学省放射能測定法シリーズ No.7“ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー”（1976 年制定，1992 年 3 訂）との整合性も考慮して，この規格本体には反映させず解説で内容を紹介することとした。

b)　1995 年に廃止された JIS Z 4520 : 1979 **（ゲルマニウムγ線検出器の試験方法）との相違**

JIS Z 4520 : 1979 では，

1)　X 線透過写真撮影法及びγ線ビームによるスキャン測定法を用いた，検出器寸法測定方法。

2)　“電流電圧特性測定方法，静電容量電圧特性測定方法，雑音特性測定方法などの電気的試験方法”

の規定項目があったが，対応国際規格 **IEC 60973**：1989 では，これらの項目の規定がないので，国際規格との整合の観点から今回の改正で削除した。

3.　各項目に対する補足説明

a)　適用範囲（本体の 1.）　本来 **JIS** の適用範囲には，目的は記述しないが，**IEC 60973**：1989 には，目的に関する記述があり，“ゲルマニウム γ 線検出器の製造業者及び使用者にとって重要な性能及び特性を試験する標準的試験方法を確立し，製造業者及び使用者が実施する試験結果の整合性を図ることを目的とする。”という内容を記述し整合を図った。

b)　構造（本体の 4.）　**IEC 60973**：1989 では，ゲルマニウム γ 線検出器に関する序論として，γ 線と物質の相互作用及びスペクトルの生成に関する記述があり，一般知識として参考となるので，次にその要約を示す。

1)　γ 線と物質の相互作用及びスペクトルの生成　物質（ゲルマニウムなど）中に入射した一次光子（γ 線，X 線）は，光電効果，コンプトン散乱及び電子対生成の相互作用によって二次電子を生成し，一次光子の数は減少する。細い線束又は平行線束の一次光子が物質中で相互作用をする確率は，式 (1) による。

$$N_x/N_0 = 1 - \exp(-\mu x) \quad \cdots\cdots (1)$$

ここに，　N_0：　入射一次光子の数
　　　　　N_x：　厚さ x の物質中で相互作用をした一次光子の数
　　　　　μ：　線減弱係数で，上記二種類の相互作用の減弱係数の和

シリコンとゲルマニウムに対する相互作用断面積を，**解説図 1** に示す。

なお，相互作用の全断面積 $\Sigma(\mathrm{cm}^2)$ と線減弱係数 $\mu(\mathrm{cm}^{-1})$ との関係は，式 (2) による。

$$\mu = N \times \Sigma \quad \cdots\cdots (2)$$

ここに，　N：　物質の単位体積 ($1\ \mathrm{cm}^3$) に含まれる原子数

相互作用の概要は，次による。

1.1)　光電効果　入射光子は原子の軌道電子（主に K，L 殻）に全エネルギーを与え，その軌道電子は原子から放出される。放出された電子の運動エネルギーは，入射光子のエネルギー (E_γ) から軌道電子の結合エネルギー (B) を引いた値 ($E_\gamma - B$) である。光電効果に対する断面積（**解説図 1** の τ）は，物質の原子番号 (Z) と光子エネルギー (E_γ) に大きく依存し，すべての軌道電子では，ほぼ $Z^4/E_\gamma{}^3$ に比例する。結合エネルギー (B) に相当するエネルギーは光電効果に続いて二次的に発生する特性 X 線やオージェ電子として物質（ゲルマニウム結晶）内で吸収されるので，結果的には全エネルギーが吸収され，ゲルマニウム検出器からの信号は γ 線エネルギーに相当する線スペクトル（ピーク）を形成する。

なお，100 keV 程度以下の低エネルギー光子の場合，Ge－KX 線 ($K_\alpha = 9.9$ keV) が結晶有感部から逸脱する確率があり，$E_\gamma - 9.9$ keV に相当するエネルギーのピークが作られる。これは X 線エスケープピークといわれ，低エネルギー光子を小形のゲルマニウム検出器で測定するときに顕著に現れる。

1.2)　コンプトン散乱　コンプトン散乱が相対的に顕著に生じる光子エネルギー（数 100 keV 以上）では，軌道電子の結合エネルギーは無視できるので，コンプトン散乱は光子と電子との弾性衝突とみなされる。一次光子はエネルギーの一部を失って散乱し，軌道電子は反跳を受けて原子から解

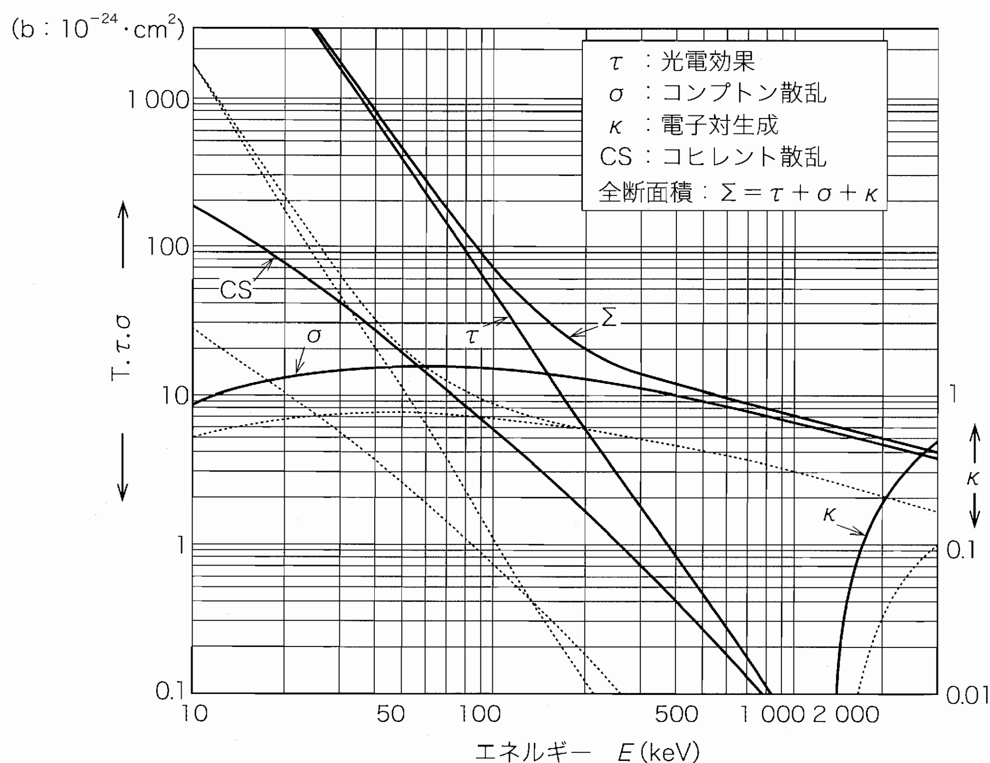
放される。コンプトン効果の断面積（**解説図 1** の σ）は光子エネルギーの増加に伴って減少するが，光電効果に比べると減少の割合ははるかに緩やか（$\sim E_\gamma^{-1}$）である。

散乱線が検出器有感部から逸脱すると，スペクトル中に連続分布を作る。また，散乱線が物質中で続いて相互作用を繰り返すこと（多重相互作用）があり，最終的に全エネルギーが吸収されると，スペクトル中に全エネルギーピークを作る。その確率は物質の大きさに依存し，通常の大きさ（100～200 cm^3）のゲルマニウム検出器では，数百 keV 以上の γ 線に対する全エネルギー吸収ピークのほとんどは，この多重相互作用によって生じるものである。そのため，ゲルマニウム結晶が大きいほどピーク効率が高く，また，ピーク対コンプトン比が高くなる。

1.3) **電子対生成**　電子対生成は，原子核（又は軌道電子）の近傍で，入射光子のエネルギーが電子と陽電子とに変換される現象である。電子対生成が起こるためには，入射光子のエネルギー（E_γ）は，1 022 keV（電子と陽電子との静止質量エネルギーの合計）以上でなければならない。電子対生成の断面積（**解説図 1** の κ）は，1 022 keV～3 MeV 程度までは E_γ－1 022 keV にほぼ比例し，それ以上の高いエネルギーでは，ほぼ $\ln(E_\gamma)$ に比例して増加する。

発生した陽電子は，運動エネルギーを失うと，近傍の軌道電子と結合して消滅し，2 本の陽電子消滅光子（511 keV）が発生する。さらに，ゲルマニウム結晶中で発生した陽電子消滅光子の相互作用によって，全エネルギー吸収（E_γ），シングルエスケープ（E_γ－511 keV），ダブルエスケープ（E_γ－1 022 keV）の 3 本のピークが作られる。

なお，電子・陽電子対は運動エネルギー（10 eV 程度）をもつので，511 keV 及び E_γ－511 keV のピークは消滅するときのドップラー効果によって 1 keV 以上広い FWHM を示す。そのため，ピーク領域の設定には注意をしなければならない。



解説図 1　Si（点線）及び Ge（実線）の相互作用断面積

2) **信号の生成とスペクトル**　**b) 1)** に述べた相互作用（多重相互作用を含む。）において，入射光子のエネルギーは生成した二次電子（1 個以上）に与えられる。相互作用で生じた高速二次電子は，結晶の有感部（空乏領域）内で電離作用によって運動エネルギーを失い，多数の電子・正孔対を生成する。生成した電子・正孔対の数は二次電子の合計の運動エネルギーに正確に比例するので，全エネルギー吸収では入射光子のエネルギーに相当する信号となってスペクトルにピークを形成する。もし，散乱線が結晶有感部から逸脱すると，一部のエネルギーが二次電子に与えられてスペクトルに連続分布を形成する。

1 個の電子・正孔対を生成するのに必要な平均エネルギーは，ゲルマニウム（−196 ℃）では 2.96 eV，シリコン（室温）では 3.61 eV である。発生電荷 Q (C) は，式 (3) による。

$$Q = 1.602\times10^{-19}\times N_{\mathrm{i}} \quad \cdots (3)$$

ここに，　N_{i}：　生成した電子・正孔対の数

また，信号電圧は，式 (4) による。

$$V = Q/C \quad \cdots (4)$$

ここに，　C：　前置増幅器の入力端子における静電容量 (F)

この信号は，前置増幅器と主増幅器においてパルス処理（波高増幅，波形整形による信号・雑音比の改善など）がされ，マルチチャネル分析器 (MCA) の AD 変換器においてパルス波高がチャネル数に変換され，そのチャネル（アドレス）のメモリーに計数値が加算される。以上のプロセスが多くの入射光子に対して行われると，パルス波高分布（スペクトル）が作られる。

c) **エネルギースペクトル測定（本体の 6.）**　γ 線スペクトロメトリーを正しく行うには，測定及びスペクトル解析において，次に述べる機器校正が重要である。エネルギー校正のときの注意点を，次に示す。

ゲルマニウム検出器の直線性［エネルギー (E) とパルス波高 (P)］との関係は大変よいので，一般的な測定では，0〜2 000 keV のエネルギー範囲にわたって，式 (5) に示す一次式で表すことができる。安定した測定システムを用いるなら，±0.1 keV 程度の精度でエネルギーを決定することができる。

$$E = \mathrm{a} + \mathrm{b}\times P \quad \cdots (5)$$

ここに，　：a 及び b は，定数

エネルギー分解能の試験では MCA チャネル数のフルスケールを 8 K チャネルとするか，オフセット設定によってスペクトルを部分的に拡大して測定することが多い。また，環境放射能分析や施設内放射線管理などでは，エネルギー範囲を 0〜2 000 keV，MCA のフルスケールを 4 K チャネルとして，a≒0，b≒0.500 keV/ch に調整することが多い。

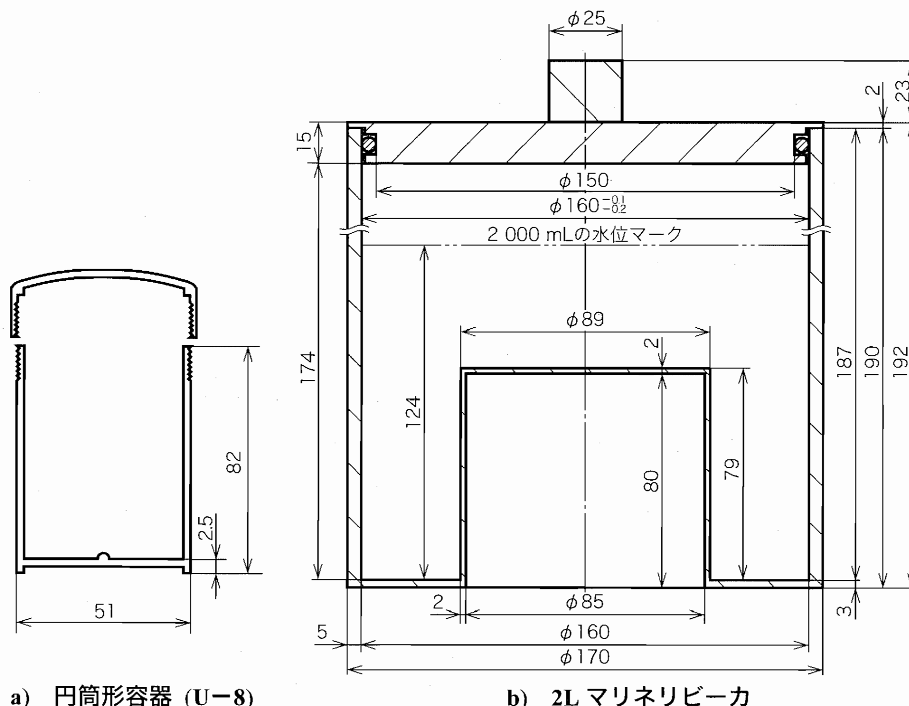
エネルギー校正は核種の同定において最も重要な機器校正であるから，システムの安定性にもよるが，エネルギー校正の頻度は多いほどよく，ある一連の測定に先立って行うことが望ましい。

d) **容積線源に対する効率**　低レベル放射能の測定では，容積が 500 ml 程度までの試料には円筒形容器（5〜7 cm）が使われ，500 mL〜2 000 mL 程度の試料にはマリネリビーカが使われる。しかし，円筒形試料容器及びマリネリビーカを用いる容積試料の測定は γ 線スペクトロメトリーの応用の一つであり，エネルギー分解能や検出器相対効率など検出器固有の性能を直接的に表すものではない。また，実際に使用されている円筒形試料容器やマリネリビーカには多くの種類があり，形状などを規格化することは困難である。円筒形容器とマリネリビーカの構造・寸法の例（放射能測定法シリーズ 7 “ゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトロメトリー” 文部科学省）を参考に，**解説図 2** に示す。

なお，通常の円筒形容器の測定に比べて，マリネリビーカによる測定には，次のような特徴がある。

— 5～20 倍の量の試料を測定することができるので，低レベル放射能の測定に適している。
— 常に一定容積の試料を充てん（填）して試料が検出器を囲う状態であるから，幾何学的効率がほぼ一定である。

単位　mm



a)　円筒形容器 (U−8)　　b)　2L マリネリビーカ

解説図 2　試料容器の構造の例

1)　ピーク効率の校正　測定試料の幾何学的条件が一定であっても，ピーク効率は検出器内における相互作用の確率で決まるので，エネルギーによって大きく異なる。容積試料の場合には，更に，試料の体積及び寸法などに依存する幾何学的条件並びに試料媒体（自己吸収に関係）によってピーク効率は異なる。

ピーク効率 (ε_P) は，式 (6) による。

$$\varepsilon_P = n\,(d \times A \times f_{SA})^{-1} \text{ 又は，} A = n\,(d \times \varepsilon_P \times f_{SA})^{-1} \quad \cdots\cdots (6)$$

ここに，
A：　試料の放射能 (Bq)
n：　ピーク計数率 (s^{-1})
ε_P：　ピーク効率
d：　γ 線の放出割合
f_{SA}：　自己吸収の補正係数

点線源及び面線源の場合，幾何学的条件を決めるパラメータは線源と検出器エンドキャップ表面までの距離であり，測定試料が容積の場合には，試料の量（又は，高さ）や媒体の種類［元素組成と充てん（填）密度］によってピーク効率が異なる。また，γ 線が結晶の有感領域に到達するまでに検出器の入射窓や結晶の不感層によって減弱し，更に全エネルギーが吸収されるプロセスは相互作用の確率に依存するため，ピーク効率は γ 線エネルギーに依存する。エネルギー依存ピーク効率を実験的に求めるには，測定対象のエネルギー範囲内で異なるエネルギーの γ 線を放出する標準線源のスペクトル（**解説図 3** 参照）を測定する。γ 線エネルギー (E) を変数とするピーク効率 $\varepsilon(E)$ は，ゲルマニウム検出器の種類及びサイズ並びに測定試料によって異なる。

関数 $\varepsilon(E)$ として，はん（汎）用性と計算のやさしさ（線形最小二乗法が適用できる）の点から式

(7) の関係がよく使われる。

$$\ln[\varepsilon(E)] = a + b \times \ln(E) + c \times [\ln(E)]^2 \quad (7)$$

ここに，a，b 及び c は定数

ただし，数 10 keV～数 MeV の広いエネルギー範囲にわたって 1 個の高次多項式で表すよりも，ある境界エネルギー（例えば，E_C＝200 keV）で区切って 2 個の式で表すのが普通である。$E < E_C$ では二次式又は三次式，$E > E_C$ では一次式などが一般的である。

このようなエネルギー依存性は，上に述べたように，エネルギーが低いほど減弱は顕著であり，特に，不感層の厚い P 形ゲルマニウム検出器ではおよそ 100 keV 以下で効率は急激に減少する。エネルギーが高いほど相互作用の確率は低くなるが，およそ 200 keV 以上では効率はエネルギーのべき乗に逆比例，すなわち，式 (8) 又は式 (9) となる。

$$\varepsilon(E) = aE^{-b} \quad (8)$$

$$\ln[\varepsilon(E)] = \ln(a) - b \times \ln(E) \quad (9)$$

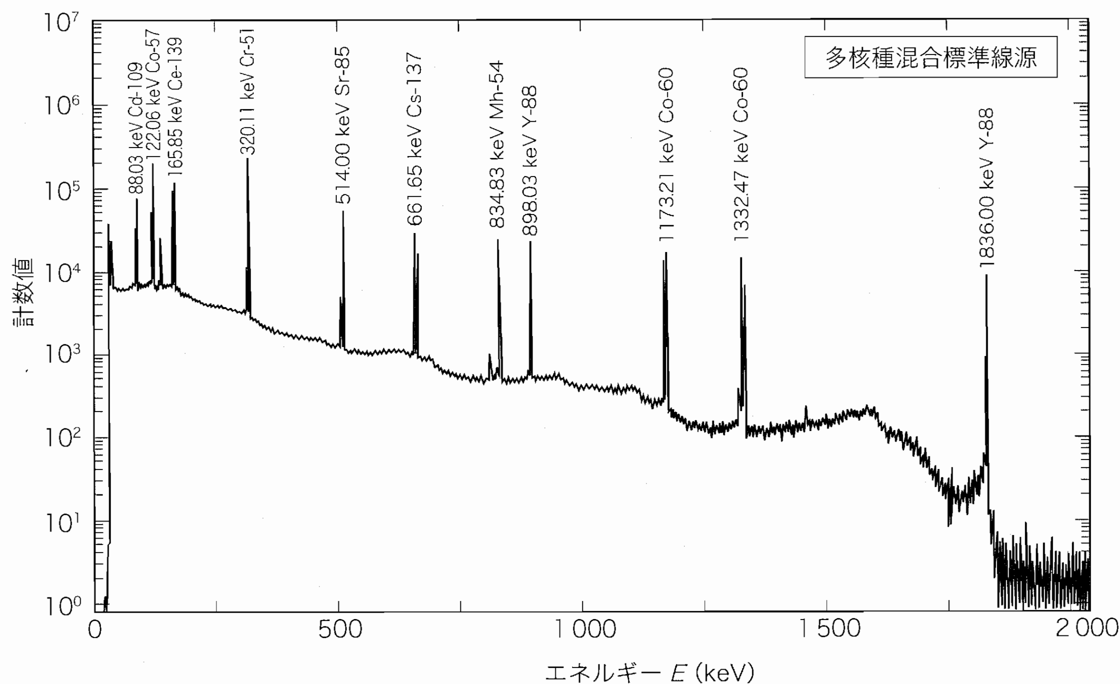
数 100 keV 以上の γ 線では，結晶内における最初の相互作用がコンプトン散乱である確率が高く，更に散乱線の多重相互作用によって全エネルギーが吸収される確率が高くなる。大きな結晶ほどこの多重相互作用の確率が高いので，上の式の負のこう（勾）配 (b) が小さく，高いエネルギーにおける効率が相対的に高くなる。γ 線エネルギー対ピーク効率の関係（効率曲線ともいう。）の例を，**解説図 4** に示す。

2) **効率校正に使われる標準線源**　ピーク効率は γ 線エネルギーに依存するので，測定するエネルギー領域の γ 線を放出する標準線源が必要である。標準線源として必要な事項は，γ 線エネルギー及び半減期，放射能 (Bq) 又は光子放出率 (s^{-1}) 及び不確かさ，検定（校正）日時，容積線源では容器の種類と寸法，媒体の種類と密度及び容積（又は寸法）である。

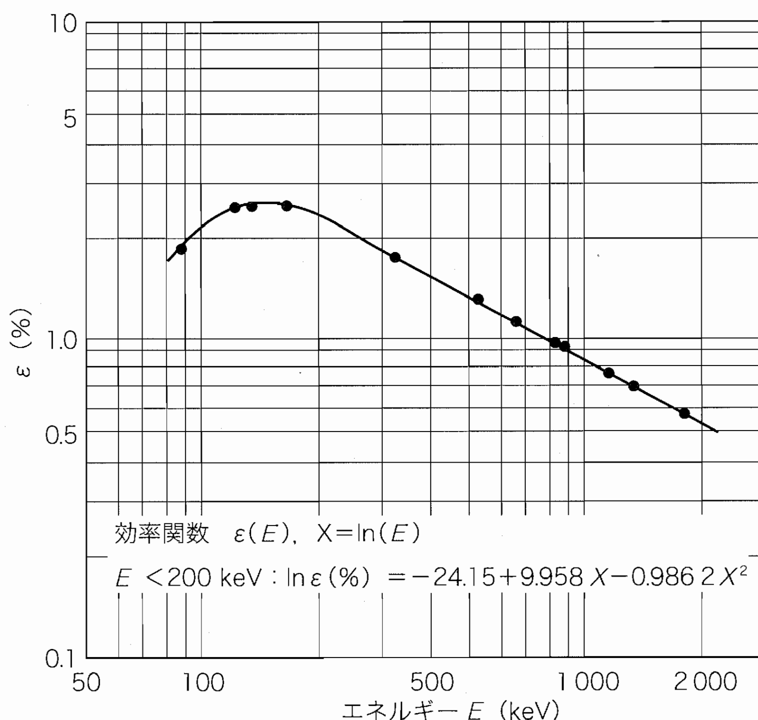
例として，80 keV から 2 MeV のエネルギー範囲でよく使われる核種のデータを**解説表 1** に，それらの核種からなる多核種混合標準線源（マリネリビーカ）の γ 線スペクトルを**解説図 3** に，そのスペクトルから求められた効率曲線（エネルギーを変数とする関数）を**解説図 4** に示す。

解説表 1　効率校正に使われる代表的な放射性核種

核種	半減期	主な γ 線 エネルギー keV	γ 線放出割合 %
^{109}Cd	463.0 日	88.03	3.61
^{57}Co	271.8 日	122.06 136.47	85.6 10.7
^{139}Ce	137.6 日	165.85	79.9
^{51}Cr	27.7 日	320.08	10.1
^{85}Sr	64.84 日	514.01	95.7
^{137}Cs	30.07 年	661.66	85.2
^{54}Mn	312.1 日	834.85	93.7
^{88}Y	106.6 日	898.04	100
^{60}Co	5.271 年	1 173.24 1 332.50	100 100
^{88}Y	106.6 日	1 836.06	99.2



解説図 3　多核種混合標準線源のγ線スペクトル



解説図 4　2 000 mL（アルミナ）マリネリビーカに対する効率，検出器の相対効率

e) サム効果　一壊変当たり 2 本以上のγ線を同時に放出する核種の測定では，そのγ線が同時に検出されると両パルス波高の和に相当するパルス波高をもつ信号が生じる。その結果として全エネルギー吸収ピークの計数率が低くなる。この現象は，コインシデンスサム効果又はサム効果といわれる。

サム効果は検出効率だけでなく核種の壊変形式に依存するため，多くの同時γ線（カスケードγ線ともいう。）を放出する核種では，サム効果の確率は大変複雑な関係にある。例えば，^{152}Eu の場合，

多くのカスケードγ線だけでなく，EC 壊変に伴って放出される特性 X 線とのサム効果が生じ，その補正は大変複雑である。

最も簡単な例として，^{60}Co のように 2 本のγ線 (A, B) が同じ割合で同時に放出される場合を，次に説明する。

サム効果がある場合，γ線 A 及びγ線 B の実測ピーク効率をε_A^* 及びε_B^*，サムピークの効率をε_{SUM}とすると，式 (10)〜式 (12) で表される。

$$\varepsilon_A^* = \varepsilon_A (1 - T_B) \cdots\cdots (10)$$

$$\varepsilon_B^* = \varepsilon_B (1 - T_A) \cdots\cdots (11)$$

$$\varepsilon_{SUM} = \varepsilon_A \times \varepsilon_B \cdots\cdots (12)$$

ここに，　$\varepsilon_A, \varepsilon_B$：　サム効果がないと仮定した場合の$\gamma$線 A 及び$\gamma$線 B のピーク効率

T_A, T_B：　γ線 A 及びγ線 B に対する全効率（連続部分を含む全スペクトル面積に対する効率）

全効率を実験的に求めるには，1 本のγ線だけを放出する核種（^{137}Cs など）が必要であるが，このような核種は限られており，広いエネルギー範囲において T を求めることは必ずしも容易ではない。実際には，検出器の相対効率 (η) とγ線エネルギーを変数とするピーク・トータル比 $P_\eta(E)$ の実験式（放射能測定法シリーズ 7“ゲルマニウム半導体検出器によるγ線スペクトロメトリー”文部科学省）を用いて，式 (13) で $T(E)$ を計算して，サム効果の補正を行う。

$$T(E) = \varepsilon(E)/P_\eta(E) \cdots\cdots (13)$$

^{60}Co (1 173 keV, 1 332 keV) と ^{88}Y (898 keV, 1 836 keV) とのピーク効率は，このようにしてサム効果（およそ 8 %）が補正された値である。式 (10)〜式 (13) からも分かるように，効率 ($\varepsilon, T, \varepsilon_{SUM}$) が高いほどサム効果の影響は大きく，場合によっては数 10 %以上にもなるので，サム効果の補正は不可欠である。特に，井戸形検出器では効率が高いため，実測される全エネルギーピークはかなり低くなり，サムピークが大きくなる。

f)　**低バックグラウンドゲルマニウム検出器**　バックグラウンド計数の主な要因は，宇宙線，測定室建材や遮へい材及び検出器素材中に存在する放射性核種，そして空気中ラドンの娘核種である。低レベル放射能の測定では，目的とする放射性核種以外に起因する外部からのγ線を低減するための測定法が必要である。一般的に，あらゆる環境の条件に適合する測定方法及び不特定の状況に対する低バックグラウンドゲルマニウム検出器を定量的に記述することは困難である。

一般環境に存在する放射性核種とγ線エネルギーとを**解説表 2** に示す。これらの放射性核種によるバックグラウンドへの寄与は，その核種の放射能（濃度），放出する放射線の種類及びエネルギーと放出割合，そして検出器との距離に依存する。

検出器自体の構成素材中に存在する微量の放射性物質の量は，検出器を構成するそれぞれの素材に存在する放射性核種の天然存在比に関係する。しかし，素材中の成分は精製及び製造過程に関係するため，親核種と娘核種は必ずしも平衡状態ではないことに注意する必要がある。低バックグラウンドゲルマニウム検出器には，放射性核種含有量が一般的に低い材料を選んで，クライオスタット，検出器マウント及びその他の部品に使われる。遮へい体の構成，大きさ及び検出器の種類若しくは大きさなど複雑な関係がある。

解説表 2　一般環境に存在する主な放射性核種及び代表的なγ線エネルギー

放射性核種	γ線エネルギー (keV)
^{235}U	185.7
^{212}Pb	238.6
^{228}Ac	338.4
^{208}Tl	583.1
^{214}Bi	609.3
^{137}Cs	661.7
^{228}Ac	911.1
^{228}Ac	968.9
^{214}Bi	1 120.3
^{60}Co	1 173.2
^{60}Co	1 332.5
^{40}K	1 460.8
^{214}Bi	1 764.5
^{214}Bi	2 204.2
^{208}Tl	2 614.5

4.　懸案事項　**IEC 60973** : 1989 は，この規格の原案作成時点では，CD（委員会ドラフト）の段階であったが，数年後には改正版が刊行される見込みであり，国際整合性の観点から改正版に沿ってこの規格の見直しが必要である。

5.　原案作成委員会の構成表　原案作成委員会の構成表を，次に示す。

JIS Z 4520 改正原案作成委員会 構成表

		氏名	所属
（委員長）		濱 田 達 二	社団法人日本アイソトープ協会
（オブザーバ）		岩 永 明 男	経済産業省産業技術環境局
（委員）		小 原 　 薫	文部科学省科学技術・学術政策局
		前 川 之 則	経済産業省資源エネルギー庁原子力安全・保安院
		永 井 克 尚	財団法人日本規格協会
（分科会委員長）	○	中 村 吉 秀	社団法人日本アイソトープ協会
	○	南 　 賢太郎	財団法人原子力安全技術センター
	○	檜 野 良 穂	独立行政法人産業技術総合研究所計測標準研究部門
	○	川 崎 克 也	独立行政法人日本原子力研究開発機構東海研究開発センター原子力科学研究所
	○	吉 田 忠 義	独立行政法人日本原子力研究開発機構核燃料サイクル工学研究所
	○	原 口 和 之	東京電力株式会社原子力運営管理部
	○	谷 口 和 史	日本原子力発電株式会社発電管理室
	○	渡 辺 　 想	三菱重工業株式会社原子力事業本部原子力技術部
	○	太 田 裕 二	財団法人日本分析センター
	○	齋 藤 正 喜	セイコー・イージーアンドジー株式会社技術部
	○	野 口 正 安	キャンベラジャパン株式会社技術部
	○	松 原 昌 平	アロカ株式会社計測システム技術部
	○	青 山 　 敬	富士電機システムズ株式会社放射線システム技術部
	○	酒 井 宏 隆	株式会社東芝電力・社会システム社原子力計装制御システム部
	○	渡 井 勝 範	応用光研株式会社計測機器部
	○	平 野 泰 裕	株式会社千代田テクノル営業推進本部
	○	渡 邉 道 彦	シー・エス・シー
（オブザーバ）	○	山 田 崇 裕	社団法人日本アイソトープ協会
（事務局）		久保野 隆 一	社団法人日本電気計測器工業会

備考　○印は，分科会委員を示す。

（文責　**JIS Z 4520**　改正委員会）

★内容についてのお問合せは，規格開発部標準課［**FAX**(03)3405-5541 **TEL**(03)5770-1571］へご連絡ください。

★**JIS** 規格票の正誤票が発行された場合は，次の要領でご案内いたします。

(1) 当協会発行の月刊誌“標準化ジャーナル”に，正・誤の内容を掲載いたします。

(2) 原則として毎月第 3 火曜日に，“日経産業新聞”及び“日刊工業新聞”の **JIS** 発行の広告欄で，正誤票が発行された **JIS** 規格番号及び規格の名称をお知らせいたします。

なお，当協会の **JIS** 予約者の方には，予約されている部門で正誤票が発行された場合，自動的にお送りいたします。

★**JIS** 規格票のご注文は，出版事業部出版サービス第一課［**TEL**(03)3583-8002 **FAX**(03)3583-0462］又は下記の当協会名古屋支部，関西支部におきましても承っておりますので，お申込みください。

JIS Z 4520
ゲルマニウムγ線検出器の試験方法

平成 19 年 9 月 20 日　第 1 刷発行

編集兼発行人　島　弘　志

発 行 所

財団法人　日　本　規　格　協　会

〒107-8440　東京都港区赤坂 4 丁目 1-24
http://www.jsa.or.jp/

札 幌 支 部　〒060-0003　札幌市中央区北 3 条西 3 丁目 1　札幌大同生命ビル内
TEL (011)261-0045　FAX (011)221-4020

東 北 支 部　〒980-0811　仙台市青葉区一番町 2 丁目 5-22　穴吹第 19 仙台ビル内
TEL (022)227-8336(代表)　FAX (022)266-0905

名古屋支部　〒460-0008　名古屋市中区栄 2 丁目 6-1　白川ビル別館内
TEL (052)221-8316(代表)　FAX (052)203-4806

関 西 支 部　〒541-0053　大阪市中央区本町 3 丁目 4-10　本町野村ビル内
TEL (06)6261-8086(代表)　FAX (06)6261-9114

広 島 支 部　〒730-0011　広島市中区基町 5-44　広島商工会議所ビル内
TEL (082)221-7023　FAX (082)223-7568

四 国 支 部　〒760-0023　高松市寿町 2 丁目 2-10　JPR 高松ビル内
TEL (087)821-7851　FAX (087)821-3261

福 岡 支 部　〒812-0025　福岡市博多区店屋町 1-31　ダヴィンチ博多内
TEL (092)282-9080　FAX (092)282-9118

Printed in Japan　SG/B

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD

Test procedures for germanium gamma-ray detectors

JIS Z 4520 : 2007

(JEMIMA/JSA)

Established 2007-09-20

Investigated by

Japanese Industrial Standards Committee

Published by

Japanese Standards Association

定価 2,100 円（本体 2,000 円）

ICS 17.240

Reference number：JIS Z 4520 : 2007(J)